

① BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 197 03 128 A 1

⑥ Int. Cl.⁶
G 01 R 15/24
G 01 R 19/32

⑳ Aktenzeichen: 197 03 128.5
㉑ Anmeldetag: 29. 1. 97
㉒ Offenlegungstag: 6. 8. 98

㉓ Anmelder:
ABB Research Ltd., Zürich, CH

㉔ Vertreter:
Lück, G., Dipl.-Ing. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 79761
Waldshut-Tiengen

㉕ Erfinder:
Bohnert, Klaus, Dr., Niederrohrdorf, CH; Brändle,
Hubert, Dr., Oberengstringen, CH; Schanke, Tone,
Oslo, NO

㉖ Entgegenhaltungen:

DE 28 55 337 C2
DE 24 45 369 B1
DE 42 24 190 A1
DE 04 762 A1

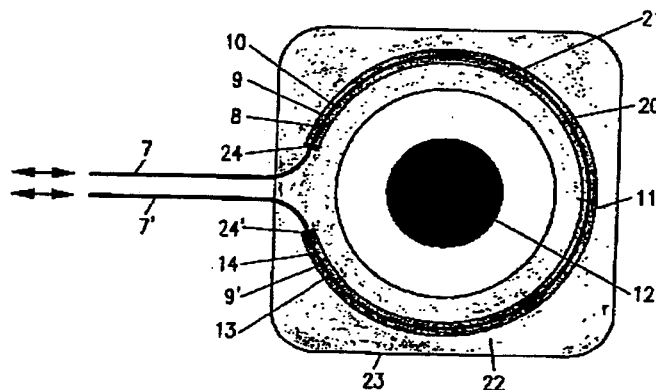
FROSIO, G. DÄNDLIKER, R.: Reciprocal reflection
interferometer for fiber-optic Faraday current
Sensor, In: APPLIED OPTICS, Vol. 33, No. 25,
1994, S. 6111 ff;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉗ Magnetooptischer Stromsensor

㉘ Ohne besondere Maßnahmen sind eine faseroptische Stromsenserspule (11) und faseroptische $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9'), die zu der Stromsenserspule (11) in Reihe geschaltet sind, temperaturabhängig bezüglich einer relativen Phasenverzögerung eines durchgehenden Lichtes. Um eine Temperaturkorrektur oder -Kompensation zu vermeiden, werden die Stromsenserspulen (11) und ggf. auch die $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9') getempert, so daß keine mechanischen Spannungen in den optischen Fasern verbleiben. Vorzugsweise ist die Stromsenserspule (11) in einer mit einem Schutzgas gefüllten Kapillare (20) zwanglos gelagert. Die Kapillare (20) ist gasdicht in eine Vergußmasse (22) aus Polyurethan eingebettet und somit auch mechanisch geschützt.



DE 197 03 128 A 1

Bei der Erfindung wird ausgegangen von einem magnetooptischen Stromsensor nach dem Oberbegriff der Patentansprüche 1 und 2.

Stand der Technik

Mit dem Oberbegriff der Patentansprüche 1 und 2 nimmt die Erfindung auf einen Stand der Technik Bezug, wie er aus einer Veröffentlichung von K. Bohnert, H. Brändle und G. Frosio: FIELD TEST OF INTERFEROMETRIC OPTICAL FIBER HIGH-VOLTAGE AND CURRENT SENSORS, Tenth International Conference on OPTICAL FIBRE SENSORS, Glasgow, Scotland, 11-13 October 1994, S. 16-19, veröffentlicht durch SPIE-The International Society for Optical Engineering, Volume 2360, bekannt ist. Dort ist ein faseroptischer Stromsensor angegeben, bei dem Laserlicht über einen Faserkoppler und einen Faserpolarisator zu einem Y-Verzweiger gelangt, an dem es in 2 linear polarisierte Teilwellen aufgeteilt wird. Die 1. Welle läuft über einen Phasenmodulator, eine ca. 90 m lange optische Glasfaser, welche die lineare Polarisation erhält, zu einer 1. $\lambda/4$ -Faserschleife. In der Schleife wird die lineare in eine zirkulare Polarisation verwandelt. Das zirkular polarisierte Licht durchläuft eine faseroptische Sensorspule mit einem Durchmesser von 42 cm und 20 Windungen, die eine relativ geringe Doppelbrechung aufweist. Das aus der Sensorspule austretende, im Idealfall immer noch zirkular polarisierte Laserlicht wird in einer 2. $\lambda/4$ -Faserschleife wieder in linearpolarisiertes Licht zurückverwandelt und läuft über eine weitere ca. 90 m lange polarisationserhaltende Glasfaser und den Phasenmodulator zum Y-Verzweiger zurück. Die 2. Teilwelle durchläuft den optischen Kreis mit den gleichen Polarisationszuständen in der entgegengesetzten Richtung. Im Y-Verzweiger werden beide zurückkehrenden Wellen zur Interferenz gebracht. Das resultierende Interferenzsignal gelangt über den Faserpolarisator und den Faserkoppler zu einer Photodiode. Das Magnetfeld des elektrischen Stroms, der von der Faserspule umschlossen wird, erzeugt eine optische Phasenverschiebung zwischen den beiden gegenläufigen Lichtwellen in der Spule. Die Phasenverschiebung wird als eine entsprechende Änderung des Interferenzsignals detektiert. Die biegeinduzierte, lineare Doppelbrechung der $\lambda/4$ -Schleifen und damit die relative Phasenverzögerung sind temperaturabhängig. Ebenso ändert sich die lineare Doppelbrechung der Faserspule mit der Temperatur. Diese Effekte sind besonders bei tiefen Temperaturen stark ausgeprägt, weil sich hier gewöhnlich der Plastikschrutzmantel der Faser verhärtet und zusätzliche Doppelbrechung erzeugt. Die Folge ist eine Veränderung der Meßempfindlichkeit des Sensors. Diese Effekte zeigen oft ein hystereseartiges Verhalten, so daß auch bei bekannter Temperatur eine exakte Korrektur dieses Signals kaum möglich ist.

In einem relativ eingeschränkten Temperaturbereich zwischen 0°C und 70°C ändert sich in dem beschriebenen Fall die relative Phasenverzögerung in der Sensorspule um ca. 7° und in der $\lambda/4$ -Schleife um 4°. Bei einem Strom von 900 A und konstanter Temperatur betrug der relative Meßfehler $\pm 0,15\%$.

Zum einschlägigen Stand der Technik wird noch auf die Veröffentlichung von G. Frosio und R. Dändliker, Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor in: Applied Optics, Vol. 33, No. 25, 1. September 1994, S. 6111-6122, verwiesen. Dort ist die Sensorspule endseitig verspiegelt. Dabei treten die gleichen Temperatur-

abhängigkeiten wie bei dem Stromsensor in dem eingangs genannten Konferenzbericht auf.

Darstellung der Erfindung

Die Erfindung, wie sie in den Patentansprüchen 1 und 2 definiert ist, löst die Aufgabe, einen magnetooptischen Stromsensor der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, daß dessen Temperaturabhängigkeit vernachlässigbar ist.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen definiert.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, daß eine aufwendige Temperaturkompensation oder -Korrektur entfallen kann.

Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung können bei dem angegebenen Sagnac-Interferometer alle Lichtübertragungswege Lichtfasern sein. Dies ist besonders kostengünstig.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Sagnac-Interferometer mit $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern und einer Stromsensorspule in einer Prinzipdarstellung,

Fig. 2 eine Anordnung der Stromsensorspule gemäß Fig. 1 in einem Gehäuse,

Fig. 3 Querschnitte von Glasfaserkernen und Lichtamplituden an einem Übergang von einer Zuleitungsfaser und einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied und

Fig. 4 ein Sagnac-Interferometer mit einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied und einer endseitig verspiegelten Stromsensorspule in einer Prinzipdarstellung.

Wege zur Ausführung der Erfindung

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

Fig. 1 zeigt ein Sagnac-Interferometer mit einer Lichtquelle bzw. einem Mehrmodenlaser (1), der Licht über einen 1. Faserkoppler (2), einen 1. Lichtfaserpleiß (3) zu einem Faserpolarisator (4) sendet. Das aus dem Faserpolarisator (4) austretende, linear polarisierte Licht gelangt über einen 2. Lichtfaserpleiß (5) zu einem 2. Faserkoppler (6), wo es in 2 Teilwellen zerlegt wird. Die 1. Teilwelle läuft über eine polarisationserhaltende, optische Zuleitungsfaser (7) mit elliptischem Querschnitt des Faserkerns, einem 3. Lichtfaserpleiß (8) zu einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) aus einer weiteren optischen Lichtfaser mit elliptischem Querschnitt des Faserkerns. Aus diesem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) tritt das Licht zirkularpolarisiert über einen 4. Lichtfaserpleiß (10) in eine faseroptische Stromsensorspule (11) mit geringer linearer Doppelbrechung aus einem magnetooptisch aktiven Material, wie z. B. Quarzglas, ein, welche mehrere Windungen um einen Stromleiter (12) aufweist. Aus dieser Stromsensorspule (11) tritt das zirkular polarisierte Licht über einen 5. Lichtfaserpleiß (13) in ein 2. $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9') ein, das gleich dem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) ist. Aus diesem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9') austretendes Licht ist wieder linear polarisiert und gelangt über einen 6. Lichtfaserpleiß (14), über eine polarisationserhaltende optische Rückleitungsfaser (7') mit elliptischem Querschnitt des Faserkerns und über einen piezoelektrischen Modulator bzw. Phasenmodulator (15) zum 2. Faserkoppler (6) zurück. Die 2., am Faserkoppler (6) erzeugte Teilwelle durchläuft den optischen Kreis in entgegengesetzter Richtung. Die beiden

zurückkehrenden Wellen werden im 2. Faserkoppler (6) zur Interferenz gebracht. Das optische Interferenzsignal läuft über den 2. Lichtfaserpleiß (5), den Faserpolarisator (4), den 1. Lichtfaserpleiß (3) und den 1. Faserkoppler (2) zu einem Lichtdetektor bzw. einer Photodiode (16). Die Photodiode (16) liefert ausgangsseitig ein zur empfangenen Lichtintensität proportionales Lichtintensitätssignal (S16) einem Signalprozessor (17), der ausgangsseitig ein Stromsignal (18) als Meßergebnis zur Verfügung stellt und ferner ein Modulationssignal (19) an den Phasenmodulator (15) liefert. Dieses Modulationssignal (19) hat eine Frequenz im Bereich von oberhalb 100 kHz; es dient zur Einstellung des Arbeitspunktes des Sagnac-Interferometers. Vorzugsweise wird eine Phasenverschiebung von 90° eingestellt, entsprechend halber Maximalintensität, bei der eine mittels der Stromsensore (11) erfaßte Phasenverschiebung eine möglichst große Änderung des Lichtintensitätssignals (S16) bewirkt.

Fig. 2 zeigt ein um den Stromleiter (12) angeordnetes, innen hohles Sensorgehäuse (23), in welchem eine Stromsensore (11) mit einem Faserdurchmesser von etwa $80\ \mu\text{m}$ mit nur einer Windung innerhalb eines Hohlraumes (21) einer kreisförmig gebogenen Kapillare (20) aus Quarzglas oder einer chromreichen Stahllegierung, wie z. B. Inconel, zwanglos gelagert ist. Die Stromsensore (11) wird vor dem Einbau in das Sensorgehäuse (23) in diesem eingelegten und kreisförmig gekrümmten Zustand bei ihrer Erweichungstemperatur von etwa 800°C während mehr als 3 h getempert, damit sie weitgehend frei von mechanischen Spannungen wird und keine davon herrührende Doppelbrechung aufweist. Nach dem Tempern wird der Hohlraum (21) mit einem Schutzgas, vorzugsweise SF_6 , gefüllt und durch Dichtungen (24, 24') z. B. aus Indium, Silber oder Gold gasdicht verschlossen, um zu verhindern, daß Feuchtigkeit und chemisch aggressive Dämpfe in das Innere der Kapillare (20) eindringen können. Innerhalb des Hohlraumes (21) sind auch die $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9) und (9') und Teile der optischen Zuleitungsfaser (7) sowie der Rückleitungsfaser (7') untergebracht. Eine üblicherweise auf der Stromsensore (11) vorhandene Schutzschicht (nicht dargestellt) ist nach dem Tempern nicht mehr vorhanden. Die Kapillare (20) mit einem Innendurchmesser von einigen $100\ \mu\text{m}$ ist in einer Vergußmasse, wie sie für elektronische Bauteile üblich ist, z. B. aus Polyurethan oder aus einem Silikonschaumstoff, eingebettet; sie dient als Schutz gegen störende mechanische und chemische Einflüsse.

Es versteht sich, daß die Stromsensore (11) mehrere Windungen, entsprechend Fig. 1, aufweisen kann. Anstelle eines Schutzgases könnte auch Öl oder Vakuum im Hohlraum (21) sein. Bei Verwendung von Öl kann die Kapillare (20) aus einem Kunststoff bestehen und nach dem Tempern über die Lichtfaser der Stromsensore (11) geschoben werden. Die Aufgabe der Dichtungen (24, 24') kann auch durch die Vergußmasse (22) übernommen werden, wenn diese dafür geeignet ist.

Fig. 3 zeigt das nichtgekrümmte, lineare $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9), das über die Lichtfaserpleiße (8) und (10) mit der optischen Zuleitungsfaser (7) bzw. mit der Stromsensore (11) verbunden ist, unten in einem Längsschnitt und darüber in Querschnitten durch die entsprechenden Kerne der optischen Fasern. Mit (x) und (y) sind zueinander orthogonale Koordinatenachsen der optischen Zuleitungsfaser (7) mit elliptischem Kernquerschnitt in Richtung von deren Haupt- und Nebenachse bezeichnet und mit (E_x) eine Lichtamplitude eines linear polarisierten Lichtes (a), das durch die optische Zuleitungsfaser (7) polarisationserhaltend z. B. in Richtung der y-Achse übertragen wird. Mit (x') und (y') sind zueinander orthogonale Koordinatenachsen der

Lichtfaser des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) mit elliptischem Kernquerschnitt in Richtung von deren Haupt- und Nebenachse bezeichnet und mit ($E_{x'}$) und ($E_{y'}$) Lichtamplituden in Richtung der x'- bzw. y'-Achse. Die Achsen (x') und (y') der Lichtfaser des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) sind gegenüber den Achsen (x) und (y) der optischen Zuleitungsfaser (7) um $45^\circ \pm \epsilon$ gedreht, so daß das linear polarisierte Licht (a) beim Übergang von der optischen Zuleitungsfaser (7) in das $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) in 2 zueinander orthogonale Komponenten ($E_{x'}$) und ($E_{y'}$) parallel zu den optischen Hauptachsen (x', y') des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) zerlegt wird. Die beiden Polarisationskomponenten breiten sich mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit aus. Die Länge des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) wird so gewählt, daß die 2 Komponenten eine relative Phasenverzögerung von $90^\circ \pm \delta$ akkumulieren, so daß zirkular polarisiertes Licht aus dem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) austritt. Für Licht mit einer Wellenlänge von 780 nm beträgt die Länge des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9), abhängig vom Fasertyp, etwa 0,7 mm–2 mm. Die Toleranzwinkel ϵ und δ sollen vorzugsweise $< 2^\circ$ sein und dürfen allenfalls 15° betragen. Für ein $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9), das aus einer kommerziell erhältlichen Faser entnommen wurde, wurde für eine Lichtwellenlänge von 788 nm in einem Temperaturbereich zwischen 40°C und 80°C eine tolerierbare Temperaturabhängigkeit von dessen Phasenverzögerung von $\pm 2^\circ$ gemessen. Diese verbleibende Temperaturabhängigkeit des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) rührt u. a. von mechanischen Spannungen zwischen dessen Faserkern und Fasermantel (nicht dargestellt) her. Diese mechanischen Spannungen können durch eine Bestrahlung der Lichtfaser (9) mit ultraviolettem Licht und/oder durch eine Temperung bei einer Temperatur oberhalb von 200°C weitgehend reduziert werden.

Die Ausführung des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9') stimmt mit derjenigen des $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) überein. Die optischen Hauptachsen (x', y') der Verzögerungselemente (9) und (9') können bezüglich der Ebene der Stromsensore (11), deren Faserkern einen runden Querschnitt hat, beliebig ausgerichtet sein.

Anstelle der faseroptischen $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9) und (9') können auch $\lambda/4$ -Plättchen (29) niedriger Ordnung, z. B. aus Quarz, verwendet werden, die ebenfalls eine geringe Temperaturabhängigkeit haben, aber teuer sind.

Fig. 4 zeigt eine andere Ausführungsform eines Sagnac-Interferometers mit einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) gemäß den Fig. 1–3 und einer endseitig verspiegelten Stromsensore (11'), die in gleicher Weise gelagert und getempert ist wie die in Verbindung mit Fig. 1 und 2 beschriebene Stromsensore (11).

Linear polarisiertes Licht von dem Mehrmodenlaser (1) wird über den Faserkoppler (2), einen Faserpolarisator (25), einen Phasenmodulator (26), eine stark doppelbrechende optische Lichtfaser (27) und das $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) der Stromsensore (11') zugeführt und von dort an einer endseitigen Verspiegelung (28) zu der Photodiode (16) reflektiert. Der Faserpolarisator (25) kann gleich aufgebaut sein wie der Faserpolarisator (4) gemäß Fig. 1 und der Phasenmodulator (26) gleich wie der dortige Phasenmodulator (15). Die stark doppelbrechende optische Lichtfaser (27) ist so lang, daß darin die Kohärenz des Lichtes verlorengeht.

Wichtig ist, daß die Stromsensoren (11) und (11') und vorzugsweise auch die $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9) und (9') frei von mechanischen Spannungen sind, so daß sie bezüglich ihrer Übertragungseigenschaften für Licht zumindest in dem vorgesehenen Anwendungsbereich temperaturunabhängig sind.

Bezugszeichenliste

1 Lichtquelle, Mehrmodenlaser	
2, 6 Faserkoppler	
4, 25 Faserpolarisatoren	5
3, 5, 8, 10, 13, 14 Lichtfaserspleiße, Glasfaserverbindungen	
7 optische Zuleitungsfaser mit elliptischem Kernquerschnitt	
7' optische Rückleitungsfaser mit elliptischem Kernquerschnitt	
9, 9' $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder, optische Fasern mit elliptischem Querschnitt, Einmodenfasern	10
11 faseroptische Stromsenserspule	
11' endseitig verspiegelte Stromsenserspule	
12 Stromleiter	
15, 26 Phasenmodulatoren, piezoelektrische Modulatoren	15
16 Lichtdetektor, Photodiode	
17 Signalprozessor	
18 Stromsignal	
19 Modulationssignal	
20 Kapillare	20
21 Hohlraum von 20	
22 Polyurethan, Silikonschaumstoff, Vergußmasse	
23 Sensorgehäuse	
24, 24' Dichtungen von 20	
27 stark doppelbrechende optische Faser	25
28 Spiegel, Verspiegelung	
29 $\lambda/4$ -Plättchen	
a linearpolarisiertes Licht	
b zirkularpolarisiertes Licht	
E_x, E_y, E_z Lichtamplitude in Richtung der x-, y-, z-Achse	30
S16 Lichtintensitätssignal	
x, x'; y, y' Koordinatenachsen	

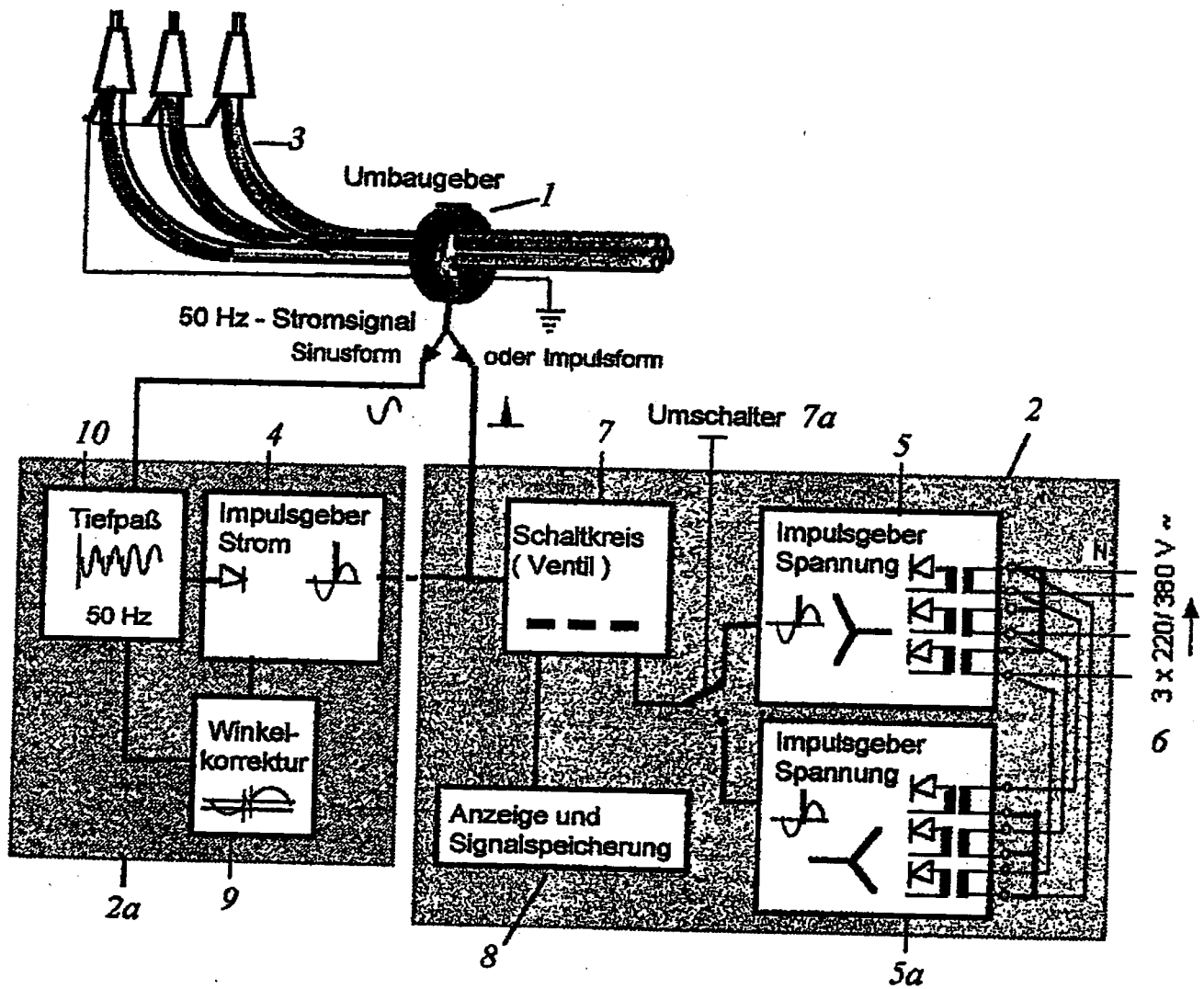
Patentansprüche

1. Magnetooptischer Stromsensor 35
 - a) mit mindestens einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9', 29) und
 - b) mindestens einer Stromsenserspule (11, 11'), dadurch gekennzeichnet, 40
 - c) daß die mindestens eine Stromsenserspule (11, 11') frei von linearer optischer Doppelbrechung ist.
2. Magnetooptischer Stromsensor
 - a) mit mindestens einem $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') und b) mindestens einer Stromsenserspule (11, 11'), dadurch gekennzeichnet, 45
 - c) daß das mindestens eine $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') eine mechanisch spannungsfreie Einmodenfaser mit elliptischem Kernquerschnitt ist. 50
3. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das mindestens eine $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') eine mechanisch spannungsfreie Einmodenfaser mit elliptischem Kernquerschnitt ist. 55
4. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Stromsenserspule (11, 11') in einer Kapillare (20) gelagert ist.
5. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß auch das mindestens eine $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) in der Kapillare (20) gelagert ist. 60
6. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapillare (20) ein Schutzgas zum Schutz der mindestens einen Stromsenserspule (11, 11') vor Feuchtigkeit und/oder chemisch aggressiven Gasen enthält. 65

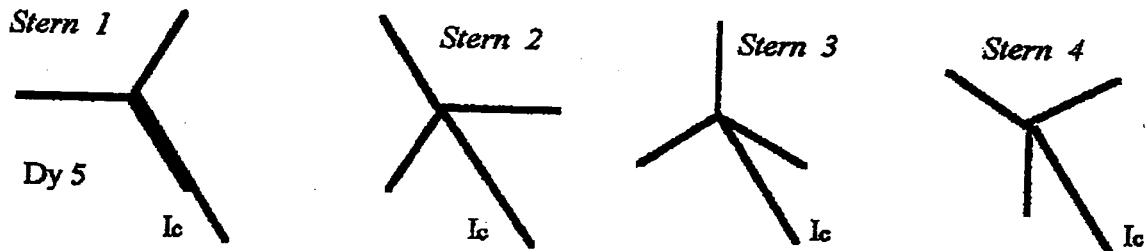
7. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapillare (20) in eine feuchtigkeitsabweisende und/oder gasdichte Vergußmasse (22) eingebettet ist.
8. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapillare (20) vakuumdicht verschlossen ist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

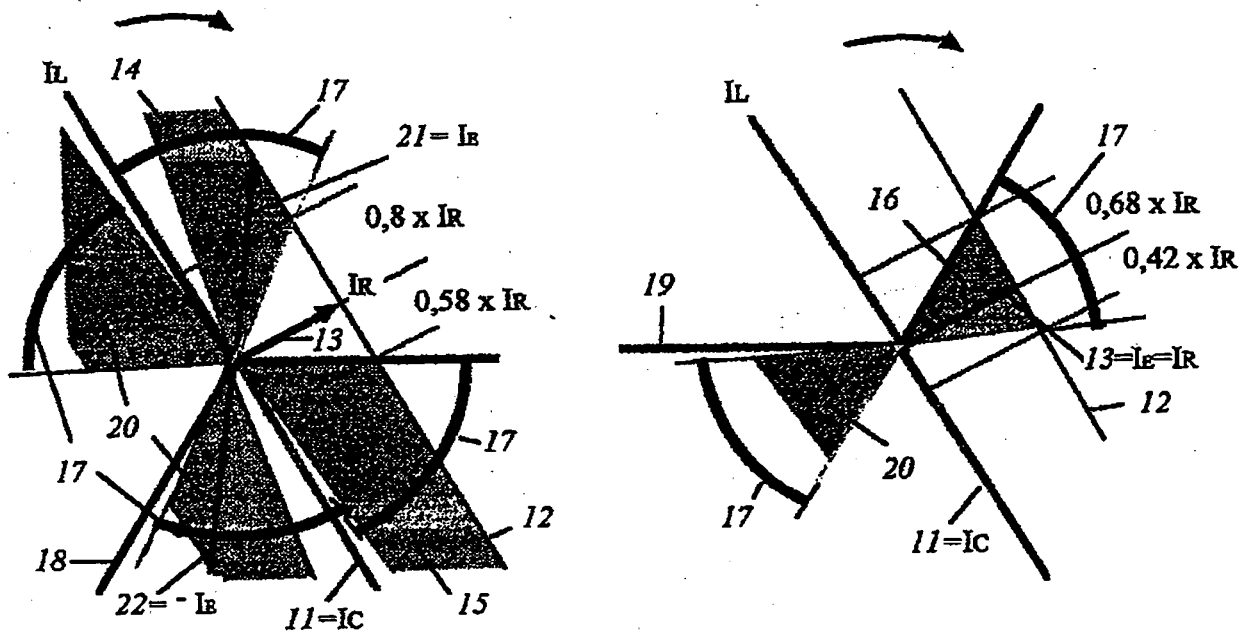
Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4

